

# **Pohony s krokovými motorky**

Stepper motor drives

**Petr Mančík**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Václav Sládeček, Ph.D.

Ostrava, 2021

## **Abstrakt**

Práce se zabývá základním rozdělením a teorií krokových motorů, principem jejich řízení a využití v automatizačním průmyslu. Dále uvádí a upřesňuje základní požadavky na propojení krokového motoru s jeho řídicím systémem a uvádí důležité vlastnosti pohonu pro správnou funkci. V poslední řadě demonstruje jednoduchou úlohu pro využití a práci se systémem Ezi-SERVO II Plus-E.

## **Abstract**

This work deals with basic partition and theory of stepper motors. With their principle of drives and the use in automatization industry. It also states and specifies the basic requirements for connecting the stepper motor with it's drive systém and points out main drive properties for it's right functionality. At last it specifies main advantages of used system Ezi-SERVO II Plus-E and demonstrates a simple task to describe work with this system.

## **Klíčová slova**

Ezi-SERVO II Plus-E, Hybridní krokové motory, krokové motory, krokové motory s proměnou reluktancí, krokové motory s permanentním magnetem, průmyslová automatizace, řídicí systémy krokových motorů

## **Keywords**

Automatization variable-reluctance stepper motors, Ezi-SERVO II Plus-E, drive systems for stepper motors, hybrid stepper motors, stepper motors, stepper motors with permanent magnet

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Rozdělení krokových motorků .....</b>	<b>8</b>
2.1	Jednovrstvé motorky s proměnnou reluktancí .....	8
2.1.1	Princip funkce jednovrstvého krokového motorku s proměnou reluktancí .....	9
2.2	Více-vrstvé motorky s proměnlivou reluktancí .....	9
2.2.1	Princip funkce více-vrstvého krokového motorku s proměnou reluktancí .....	10
2.3	Krokové motorky s permanentním magnetem .....	12
2.4	Hybridní motorky .....	13
<b>3</b>	<b>METODY ŘÍZENÍ KROKOVÉHO MOTORKU .....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Využití krokových motorků v oblasti průmyslové automatizace.....</b>	<b>17</b>
4.1	Spotřební elektronika .....	18
4.2	Automotive a letecký průmysl.....	19
4.3	Lékařský průmysl .....	19
4.4	Vědecké účely.....	20
<b>5</b>	<b>Specifikace základních požadavků na propojení krokového motorku s nadřazeným řídicím systémem .....</b>	<b>21</b>
5.1	Návrh konstrukce .....	21
5.2	Proud a napětí .....	21
5.3	Start-stop frekvence .....	21
5.4	Rezonanční frekvence .....	21
<b>6</b>	<b>Ezi-SERVO II Plus-E .....</b>	<b>22</b>
6.1	Řídící jednotka .....	22
6.2	Parametry motorku .....	22
6.3	Základní vlastnosti .....	23
6.4	Možnosti systému .....	24
<b>7</b>	<b>Demonstrační úloha.....</b>	<b>29</b>
7.1	Nastavení síťového adaptéru .....	29
7.2	Realizace úkolu .....	30
	<b>Závěr.....</b>	<b>33</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>34</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratk

$\alpha$ .....	Velikost kroku [°]
BJT .....	Bipolární tranzistor
I .....	Elektrický proud [A]
IGBT .....	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
LED .....	Light Emitting Diode (Světlo vyzařující dioda)
MOSFET .....	Polem řízený tranzistor
N .....	Počet fází statoru
p .....	Počet statorových/rotorových zubů
PLC .....	Programovatelný logický automat
PC .....	Osobní počítač
R .....	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]
ROM .....	Paměť systému
t .....	Čas [s]
U .....	Elektrické napětí [V]

## Seznam ilustrací

Obrázek 1 Krokový motorek ve specifikaci NEMA 17 [25] .....	7
Obrázek 2 Princip krokového motorku [26] .....	8
Obrázek 3 Přiblížení výběžků statoru a rotoru [4] .....	8
Obrázek 4 Průřez jednovrstvého motorku s proměnnou reluktancí [4] .....	8
Obrázek 5 Více vrstvý motorek [4] .....	10
Obrázek 6 Grafické znázornění principu funkce vícevrstvého motorku [4] .....	10
Obrázek 7 Možnosti zapojení vícevrstvého krokového motorku [4] .....	11
Obrázek 8 Krokový motorek s permanentním magnetem [3] .....	12
Obrázek 9 Bifilární zapojení statorového vinutí [3] .....	12
Obrázek 10 Zapojení statorových vinutí [3] .....	13
Obrázek 11 Průřez hybridním krokovým motorkem [4] .....	14
Obrázek 12 Znázornění jednotlivých stavů průběhu [3] .....	14
Obrázek 13 Schématické zapojení unipolárního řídícího obvodu [9] .....	15
Obrázek 14 Schématické zapojení bipolárního řídícího obvodu [9] .....	16
Obrázek 15 Využití krokového motorku pro pohyb kamerového systému [7] .....	18
Obrázek 16 Spojitost krokového motorku v automotive průmyslu [6] .....	19
Obrázek 17 Příklad využití krokového motorku pro chirurgického robota [8] .....	19
Obrázek 18 Spektrometr využívaný na území ČR [10] .....	20
Obrázek 19 Varianty pohonů EZI-SERVO II Plus E [28] .....	22
Obrázek 20 Porovnání úspěšného zastavení s nutnou korekcí [22] .....	23
Obrázek 21 Změna točivého momentu s otáčkami za minutu v případě využití DC-DC měniče a bez něj [22] .....	24
Obrázek 22 Příkazový řádek v programu Ezi-MOTION .....	24
Obrázek 23 Okno pro připojení zařízení .....	25
Obrázek 24 Výpis všech připojených zařízení [21] .....	25
Obrázek 25 Výpis všech proměnných řídícího systému .....	26
Obrázek 26 Ovladač vstupů a výstupů v programu .....	26
Obrázek 27 Okno Motion Test pro testovací práci se systémem .....	27
Obrázek 28 Opakovaný test na kontrolu poháněného systému .....	27
Obrázek 29 Seznam poziční kroků pro vykonání .....	28
Obrázek 30 Schéma zapojení systému Ezi-SERVO II Plus-E .....	29
Obrázek 31 Nastavení IP dle manuálu .....	30
Obrázek 32 Posuvníky na řídícím systému k nastavení IP .....	30
Obrázek 33 Nastavení parametrů .....	30
Obrázek 34 Nastavení pohybu v poziční tabulce .....	31
Obrázek 35 Výběr funkcí .....	31
Obrázek 36 Nastavení skoku na další krok .....	31
Obrázek 37 Možnosti výstupů poziční tabulky .....	32
Obrázek 38 Nastavení výstupů z poziční tabulky .....	32
Obrázek 39 Finální poziční tabulka .....	32

## Seznam tabulek

Tab. 1 Poměry elektrických veličin motorku při využití různých druhů zapojení .....	11
---	----

## Seznam rovnic

Rovnice 1 Výpočet kroku krokového motorku .....	9
Rovnice 2 Rovnice napájecího napětí motorku .....	15

## 1 Úvod

Krokový motorek je konstrukčně jednoduchý točivý stroj. Jedná se o speciální druh synchronního motoru, kde hlavní rozdíl spočívá v typu napájení. Krokový motorek je napájen řídicími napěťovými impulsy stejnosměrného proudu. Naopak typický synchronní stroj je napájen třífázovým střídavým proudem. [1]

Jak již název napovídá, rotor motorku je schopen pohybu pouze po předem určených krocích, které jsou přesně rozdělené do jednotlivých násobků. Pohyb rotoru zajišťují pólové dvojice ve statoru, přitahující pohyblivou část pomocí magnetického toku. Ke správné funkci motorku je důležitá řídicí elektronika umožňující ovládání otáček a směru. [1]

U nejjednodušších motorků se přesné inkrementace pohybu motorku dosahuje pomocí dvou - výběžkové metody. To znamená, že motorky mají tzv. zuby z magneticky vodivého materiálu jak na pohyblivé části, tak i na statické (rotoru a statoru) a mezi nimi malou vzduchovou mezeru (Obrázek 3). Na zubech působí odpuzivé nebo přitažlivé síly a magnetický tok procházející těmito výběžky je schopen překročit mezeru mezi nimi a minimalizovat ji, což k sobě přitáhne obě části motoru (Obrázek 2). [1, 2]

V závislosti na typu motorku může být zdrojem působícího magnetického toku permanentní magnet nebo elektrické vinutí pod proudem. V praxi se většinou vyskytují kombinace obou metod, tzv. hybridy. Zde je hlavním zdrojem magnetického toku permanentní magnet a stejnosměrné proudy procházející vinutími udávají směr toku. [1, 2]



Obrázek 1 Krokový motorek ve specifikaci NEMA 17 [25]

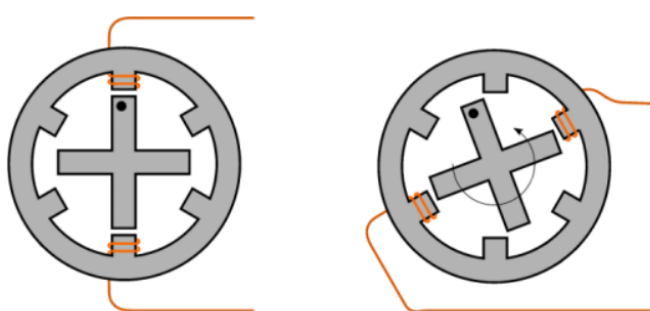
## 2 Rozdělení krokových motorků

Jak již bylo řečeno krokové motorky lze dle jejich konstrukce rozdělit do tří základních skupin.

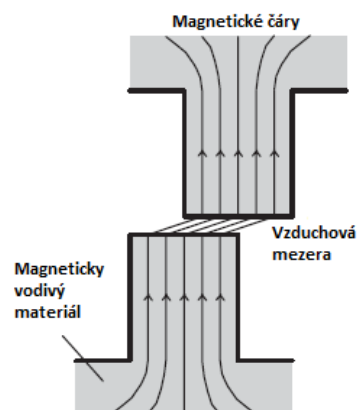
*Krokové motorky s pasivním rotorem* – Motorky s proměnnou reluktancí. Tyto motorky mají vyjádřené póly na statoru i rotoru a využívají výrazně rozdílné magnetické vodivosti (reluktance) v příčné i podélné ose. Zdrojem magnetického toku jsou vinutí umístěná na zubech statoru. Každé jednotlivé vinutí je buzeno postupně, čímž se vytvoří krok. [1, 2]

*Krokové motorky s aktivním rotorem* – Rotorové póly jsou tvořeny permanentními magnety. Existují dvě skupiny těchto motorků – s radiálně nebo axiálně polarizovaným permanentním magnetem. [1, 2]

*Krokové motorky hybridní* – Spojení obou druhů.



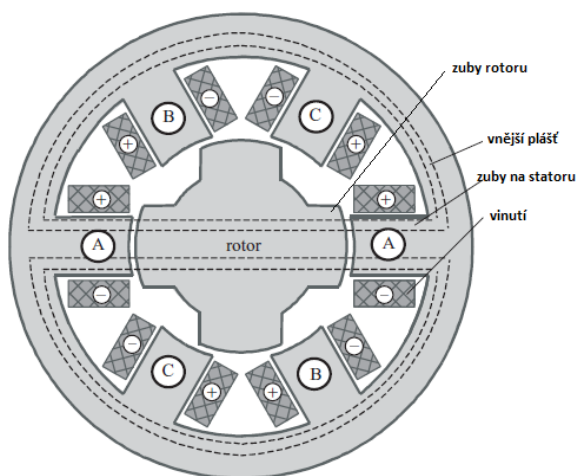
Obrázek 2 Princip krokového motorku [4]



Obrázek 3 Přiblížení výběžků statoru a rotoru [1]

### 2.1 Jednovrstvé motorky s proměnnou reluktancí

Tento typ je považovaný za nejzákladnější z krokových motorků. Sestaven je jako jedna celistvá jednotka. Základem funkce je rozdílný počet zubů na statoru a rotoru (viz. Obrázek 4). Obě hlavní části motorku jsou složeny z plechů s velmi vysokou permeabilitou. Vinutí jedné fáze jsou umístěny na protilehlých zubech statoru. Vinutí cívek jedné fáze (protilehlé zuby) musí mít rozdílnou polaritu, aby docházelo k průchodu magnetického toku jednou stranou dovnitř a druhou ven. [1]



Obrázek 4 Průřez jednovrstvého motorku s proměnnou reluktancí [1]



Každý zub statoru má své vlastní vinutí (protilehlé tvoří jednu fázi), které při buzení vytváří radiální magnetické pole. Nejmenší počet zubů na statoru je 6, čímž vytvoří 3 fáze potřebné k pohybu rotoru. Rotor je dále připojen na nebo je součástí hřídele, která pohybuje pracovním mechanismem. [1]

### 2.1.1 Princip funkce jednovrstvého krokového motorku s proměnou reluktancí

Popis funkce dle Obrázku 4. Vybuzením vinutí na zubu statoru A se dokončí obvod skrz vzduchovou mezeru a dále přes rotor do protilehlého zubu statoru s opačnou polaritou přes vnější plášť zpět do zubu A. V tomto případě se nacházíme v poloze, která je zobrazena na obrázku výše a docílili jsme jednoho kroku. Chceme-li posunout rotor o další krok, je nutno vybudit vinutí na zubu B. V našem případě budou vždy 2 protilehlé zuby rotoru srovnány zároveň s vybuzenými zuby statoru a zbývající dva budou v nerovnovážné poloze mezi zbylými zuby statoru. Jestliže momentálně vedly zuby v horizontální poloze, v dalším kroku musí magnetický tok vést zuby ve vertikální poloze, které se srovnají s vybuzeným zubem. To znamená, že rotor se musí otočit proti směru hodinových ručiček. [1]

Velikost kroku můžeme vypočítat pomocí rovnice:

Rovnice 1 Výpočet kroku krokového motorku

$$\alpha = \frac{360}{N \cdot p}$$

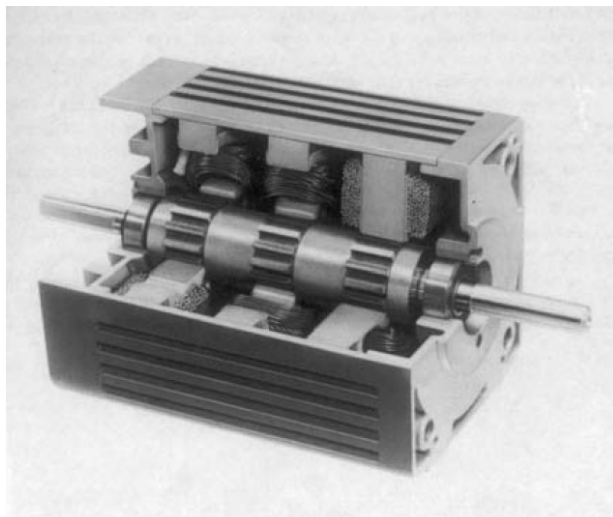
Kde N znamená počet fází (počet zubů statoru děleno 2), jelikož každá dvojice zubů je schopna vytvořit jeden krok. P je počet zubů rotoru. Rozteč zubů rotoru je rovna  $360^\circ/p$ . [1, 2]

## 2.2 Více-vrstvé motorky s proměnlivou reluktancí

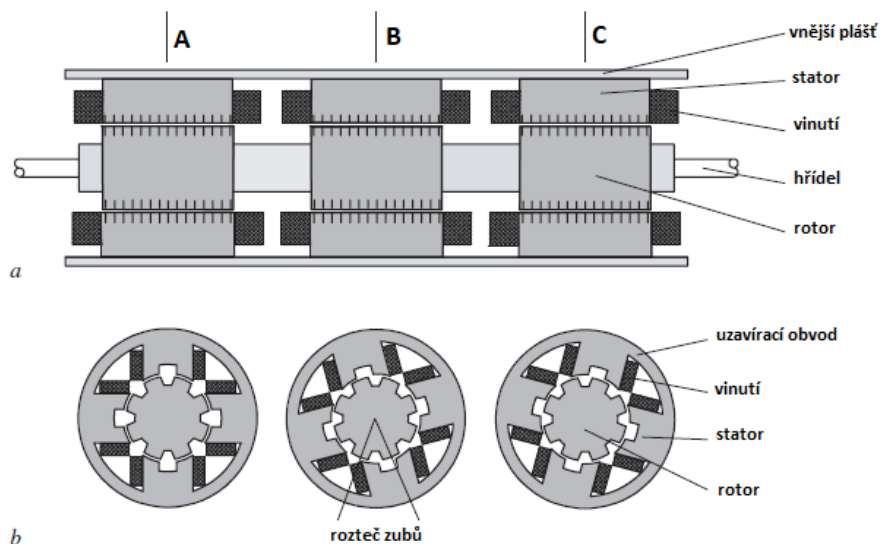
Krokový motorek je rozdělen podél své osy na magneticky oddělené vrstvy (viz. Obrázek 6). Každá z těchto částí může být vybuzena vlastním vinutím (fází). Všechny vrstvy mají svůj vlastní stator a otočnou část (rotor). Rotory jsou spojeny hřídelí tak, že tvoří jednu celistvou část, která je na obou stranách uchycena ložisky a vyvedena k pohonu zátěže. [1]

Stator i rotor motorku je vyroben z oceli, která je laminovaná, aby mohla magnetická pole motoru rychle měnit svůj směr a nedocházelo k obrovským úbytkům vířivými proudy. Statory mají vyvedeny určitý počet pólů, kde kolem každého pólu je vinuta část vinutí, aby mohlo dojít k vytvoření magnetického pole. Sousední póly musí být vinuty protichůdně, aby magnetická pole vedle sebe byla vždy opačná. Celý magnetický obvod se uzavírá přes pól statoru skrz vzduchovou mezeru napříč rotorem do protilehlého pólu statoru a zpět do původního pólu statoru přes uzavírací obvod. Síly působící mezi zuby se navzájem vyruší, takže jsou aktivní vždy dva protilehlé póly. Přesné polohy kroku dochází tak, že pokud jsou zuby statoru a rotoru úplně srovnány je odpor minimální a magnetický tok je tím pádem maximální. [1, 2]

Velikost kroku lze opět jednoduše vypočítat pomocí Vzorce 1. Dle popisu výše, když má motorek N vrstev a základní budící sekvence se skládá z toho, že každá jednotlivá vrstva je postupně buzena, otočí se rotor o jednu otočku s N kroky. Na začátku a konci této sekvence se vybudí stejná fáze a pokud jsou zuby této vrstvy srovnány znamená to, že se rotor poposunul o jednu rozteč (zub). Jelikož jedna tato rozteč se rovná  $360^\circ/p$ , kde p je počet zubů rotoru výsledkem je: [1]



Obrázek 5 Více vrstvý motorek [1]



Obrázek 6 Grafické znázornění principu funkce vícevrstvého motorku [1]

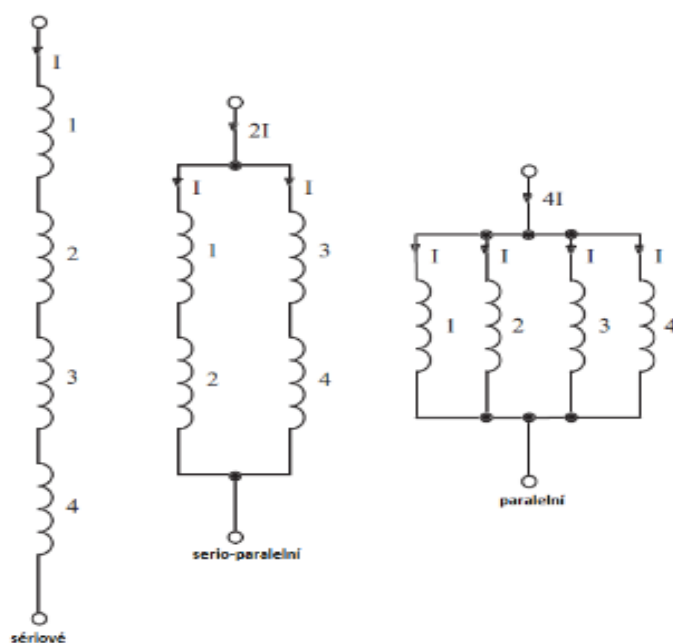
### 2.2.1 Princip funkce více-vrstvého krokového motorku s proměnou reluktancí

Motorek na Obrázku 6 má 8 zubů a nachází se v poloze odpovídající buzení vrstvy A. Zuby rotoru jsou ve všech částech motorku srovnány do stejné pozice a zuby statoru jsou vždy vzájemně v různých pozicích. Změna buzení obvodu vrstvy A do vrstvy B má za následek srovnání zubů rotoru a statoru ve vrstvě B, jelikož se druhý rotor posune po směru hodinových ručiček (na rozdíl od jednovrstvého motorku) a vytvoří tak pohyb jednoho kroku. Dalšího pohybu motorku se dosáhne vybuzením vrstvy C a odbuzením vrstvy B. Jak už bylo řečeno, celá jedna sekvence se ukončuje vybuzením opět první vrstvy. Tím pádem se zuby rotoru a statoru ve vrstvě A srovnají, akorát se rotor posunul o jednu rozteč zubů dále. [1, 2]

Velikost kroku v případě takového motorku je:

$$\alpha = \frac{360}{3 \cdot 8} = 15^\circ$$

Zobrazený motorek má v každé vrstvě 4 póly. Aby došlo ke správnému vybuzení musí se aktivovat všechna vinutí na každém pólu současně, takže vytvoří jednu společnou fázi. Na rozdíl od jednovrstvého, u kterého se budí každé vinutí zvlášť. Možnosti propojení vinutí jsou na Obrázku 7. Výsledný výkon se, ale v žádném ze zapojení nemění (viz. Tab 1). Mění se pouze potřebný proud či napětí. [1]



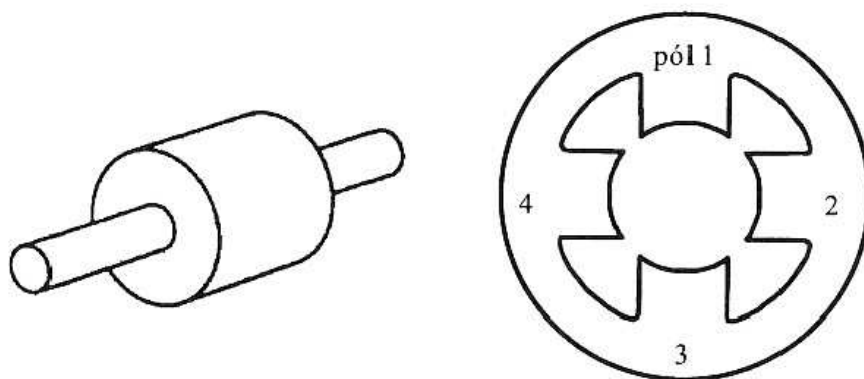
Obrázek 7 Možnosti zapojení vícevrstvého krokového motorku [1]

Tab. 1 Poměry elektrických veličin motorku při využití různých druhů zapojení

Zapojení	Proud	Odpor	Napětí	Výkon
Sériové	I	4R	4R · I	4R · I <sup>2</sup>
Serio-paralelní	2 · I	R	2R · I	4R · I <sup>2</sup>
Paralelní	4 · I	R/4	R · I	4R · I <sup>2</sup>

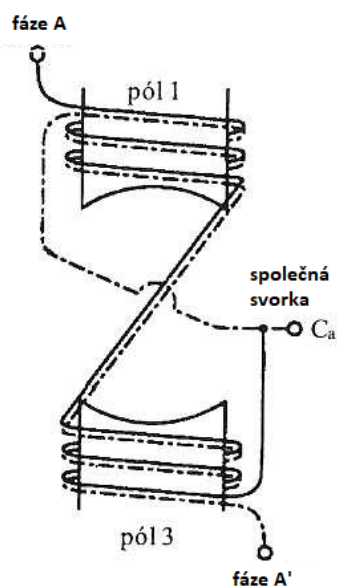
### 2.3 Krokové motorky s permanentním magnetem

Podobně jako u motorků s proměnlivou reluktancí má i zde stator vyjádřené póly, ale rotor je válcového tvaru, na kterém jsou umístěny permanentní magnety, popřípadě je z permanentního magnetu vytvořen (Obrázek 8). Každá dvojice pólů vždy tvoří jednu fázi (na obrázku 2fázový motorek). [2]



Obrázek 8 Krokový motorek s permanentním magnetem [2]

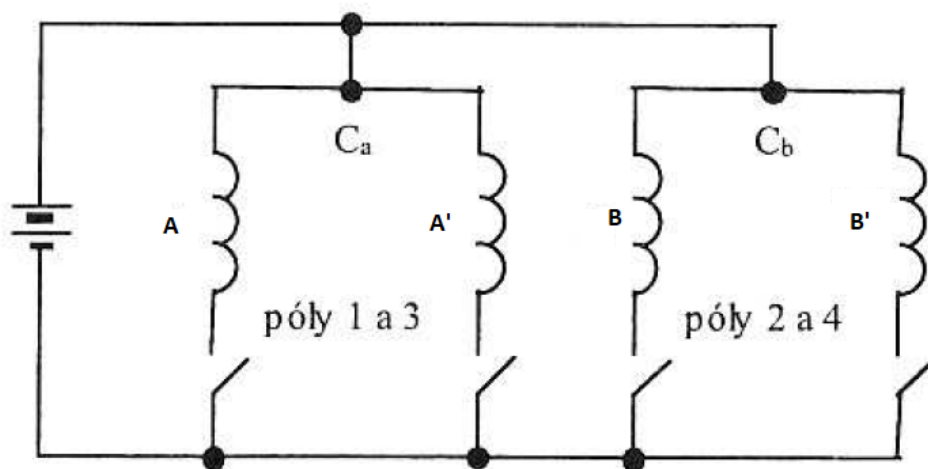
U motorků s proměnlivou reluktancí nezáleží na polaritě statorových pólů, jelikož se rotor vždy posune směrem k pólu s nejmenší reluktancí (odporem), stačí pouze dodržet směr buzení jednotlivých fází. Zde je však rotor aktivním prvkem, který má přesně definovaný počet a polaritu pólů, a proto je nutno měnit magnetickou polaritu jednotlivých pólů na statoru. Vinutí jedné fáze jsou proto navinuty bifilárně (Obrázek 9). [1, 2, 5]



Obrázek 9 Bifilární zapojení statorového vinutí [2]

Bifilární vinutí je provedené zdvojeným vodičem, které jsou na konci spojené. Tím pádem protéká proud v sousedících vodičích opačným směrem. Vznikají magnetická pole, která se sama vyruší. Na jedné cívce (pólu) bude opačný proud než na druhé, a to zaručuje změnu magnetické polarity pólů. Svorky  $C_a$  a  $C_b$  jsou společné svorky vinutí A, A' a B, B', které jsou připojeny na kladný potenciál zdroje. Pokud budíme vinutí A, vytvoří se nám na pólu 1 severní polarita a na pólu 3 polarita jižní. Při buzení A' je efekt opačný. Pokud budeme vinutí budit následovně A → B → A' → B', bude se rotor otáčet po směru hodinových ručiček s velikostí kroku  $90^\circ$ . [1, 2, 5]

Hlavní výhodou těchto motorků je velmi vysoký hmotný výkon a existence vazebního momentu bez potřeby buzení stroje. Naopak, ale má vysoký poměr točivého momentu a momentu setrvačnosti a složitost výroby motorků s malou velikostí kroku. [1, 2]



Obrázek 10 Zapojení statorových vinutí [2]

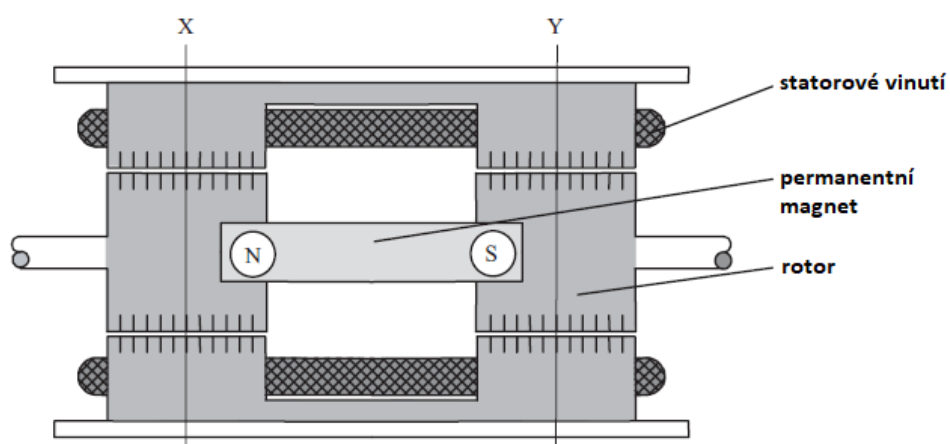
## 2.4 Hybridní motorky

Tento druh kombinuje oba uvedené typy krokových motorků. Najdeme zde opět typickou dvou-výběžkovou strukturu, ale magnetický obvod je vybuděn kombinací vinutí a permanentního magnetu. Kombinuje výhody obou struktur – velmi malý krok a vysoký hmotný výkon. [1, 2]

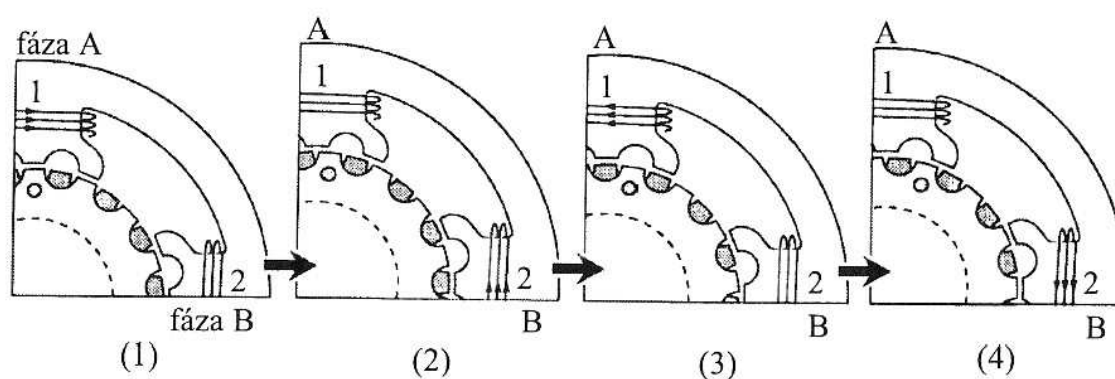
Na první pohled je hybridní motorek téměř identický jako typ s proměnlivou reluktancí, ale jeho důležitým znakem je jeho rotor. Na pólech statoru jsou umístěna vinutí (motorky s proměnlivou reluktancí) a rotor má na sobě umístěn válcový permanentní magnet (motorky s aktivním rotorem). Ten je zmagnetizován podélně (v rovině s hřídelí) a vytváří unipolární magnetické pole. Na obou koncích magnetu se nachází nástavce, které mají po svém obvodu zuby. Nástavce jsou většinou vyrobeny z křemíkových plechů. Magnetické pole vytvářené statorovým vinutím musí být heteropolární viz. Obrázek 11. [1, 2]

Mezi nejjednodušší hybridní krokové motorky se řadí dvoufázový. Tento typ má čtyři statorové póly a na každém pólu tři zuby. Protilehlé póly jsou spolu spojeny do série a tvoří vždy jednu fázi. Dle Obrázku 12: Ve stavu (1) je buzena fáze A, pól 1 přitáhne rotorové zuby severního pólu a pól 3 zase zuby jižního pólu. Ve stavu (2) je buzena fáze B, rotor se pootočí o čtvrtinu rozestupu zubů a jižní pól se srovná s pólem 4. Poté se opět vybudí fáze A, pouze s opačnou polaritou proudu a rotor se otočí o další čtvrtinu rozestupu, čímž se dostane do stavu (3). Rotor se dostal do stejné polohy jako ve stavu (1), ale jižní pól je teď seřazen s pólem 1 a severní s pólem 3. Při zapnutí proudu do fáze B, opět nastane posun o jednu čtvrtinu a vznikne rovnovážný stav (4). Velikou nevýhodou tohoto motorku je

nesymetrie momentu vzhledem k ose stroje, proto se využívá spíše dvoufázový motor s osmi póly.  
[1, 2]



Obrázek 11 Průřez hybridním krokovým motorkem [1]



Obrázek 12 Znázornění jednotlivých stavů průběhu [2]

### 3 METODY ŘÍZENÍ KROKOVÉHO MOTORKU

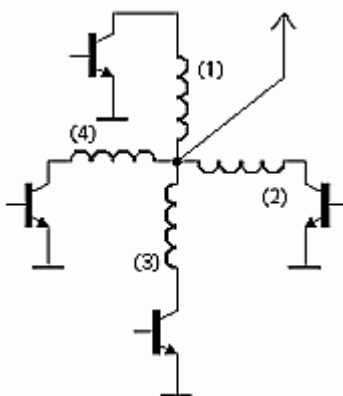
Řídící obvody se u tohoto druhu motorků liší podle typu použitého pohonu. Krokové motorky s proměnlivou reluktancí musí mít pro správnou funkčnost minimálně tři fáze neboli vinutí, ale jelikož polarita proudu je pro výsledný točivý moment nepodstatná, stačí obvod pouze vypínat či zapínat. Naopak pro ostatní typy, kde se nachází permanentní magnet, je důležitá polarita proudu, a proto nemůžeme využít pro oba stejný řídící obvod. Všechny typy řídících obvodů jsou tvořeny spínacími prvky, v drtivé většině tranzistory (BJT, MOSFET, IGBT). [1, 6, 7]

Nezákladnější a velmi rozšířené zapojení je s bipolárními tranzistory. Protože se tranzistory zde využívají jako spínače musí se pro správné fungování nacházet v oblasti saturace. Zesílení DC proudu je v této oblasti velmi nízké, takže na jejich bázi musí být přiveden dostatečně vysoký výkon. Naopak úbytek napětí na svorkách kolektor-emitor v sepnutém stavu je nízké, takže nevzniká tak vysoký ztrátový výkon. Je také možné spínání na vysokých frekvencích bez výrazných ztrát. V Darlingtonově zapojení můžeme dosáhnout výrazně většího proudového zesílení, ale také vyššího úbytku napětí a daleko nižších spínacích frekvencí. [1]

MOSFET tranzistory nabízejí oproti bipolárním výhodu v daleko nižším potřebném výkonu pro jejich provoz. Dále obsahují integrovanou nulovou diodu mezi kolektorem (DRAIN) a emitorem (SOURCE), pro můstkovou zapojení. Také mají kladný teplotní koeficient, tím pádem není problémem paralelní kombinace, nízké ztráty při napětích do 100 V a vysokou frekvenci spínání. [1]

IGBT tranzistory naopak nemají problém s vysokým drain-source odporem, který vzniká u MOSFET při vysokých napětích, a proto je zde nahrazují. Jejich hlavní výhodou je proudová zatížitelnost jako u bipolárních tranzistorů a zároveň jednoduchost řízení díky MOS struktuře. [1]

*Unipolární řízení* – Vhodný pro motorek s pasivním rotorem. Proud při této metodě prochází v jednom okamžiku právě jednou cívkou a každá fáze vinutí je buzena svým vlastním řídícím obvodem. Vinutí je buzeno, pokud na tranzistor přivedeme dostatečně vysoký bázevý proud. Napájecí napětí motorku musí být dostatečně velké, abychom na vinutí měli dostatečně velký proud i přesto, že úbytek napětí na saturemém tranzistoru je nízký (asi 0,2 V). [1, 6, 7]



Obrázek 13 Schématické zapojení unipolárního řídícího obvodu [6]

Rovnice 2 Rovnice napájecího napětí motorku

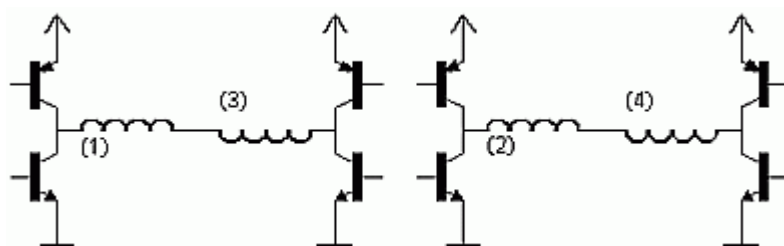
$$U_0 = I \cdot (r + R)$$

$U_0$  je napájení motorku,  $I$  je proud vinutím,  $r$  je odpor vinutí a  $R$  je odpor pro úpravu časové konstanty. Ten se přidává do řídícího obvodu, protože ve vyšších otáčkách by byl nárůst proudu příliš pomalý,

přidáním tohoto odporu k vinutí docílíme zmenšení časové konstanty a tím i rychlejšího nárustu proudu. Nechtěným následkem tohoto zapojení je možné poškození celého řídicího obvodu, pokud bychom okamžitě utnuli přívod proudu, jelikož by indukčnost na vinutí začala indukovat vcelku vysoké napětí. Tomuto jevu se zamezuje paralelním připojením diody k vinutí, aby měl proud kudy odtékat. [1, 7]

Výhoda spočívá v malém odběru energie a jednoduchosti zapojení řídicí elektroniky, ale zároveň je zde nejmenší také kroutící moment.

**Bipolární řízení** – Vhodné především pro hybridní konstrukci. Zde prochází proud vždy dvěma protilehlými cívkami s opačně orientovaným magnetickým polem. Spínají se vždy dva tranzistory najednou v závislosti na tom, jakou polaritu potřebujeme pro pohyb rotoru. Všechny 4 tranzistory v můstkovém zapojení vyžadují svůj vlastní řídicí obvod pro vedení rozdílných polarit proudu. Vrchní dvojice tranzistorů musí být uzpůsobena kladné polaritě a spodní naopak záporné, tak aby vždy dvojice opačně polarizovaných tranzistorů mohla spínat. Řídicí signály vrchních tranzistorů bývají často odděleny optočlenem. I zde může dojít k poškození obvodu z důvodu naindukovaného napětí, a proto jsou zpětné diody připojeny zvlášť ke každému z tranzistorů. Kroutící moment je zde značně větší, což ale platí také o spotřebě. Řídicí jednotka je obecně taktěž složitější. [1, 6]



Obrázek 14 Schématické zapojení bipolárního řídicího obvodu [6]



## 4 Využití krokových motorků v oblasti průmyslové automatizace

Vysoká složitost zapojení v automatizaci byla v minulosti důvodem velmi vysokých nákladů na vývoj a proces automatizace byl tak pro mnoho firem z důvodu ekonomiky značně nezajímavý. Především tedy elektronické komponenty představovaly neúměrný růst nákladů. Technický pokrok však přispívá k tomu, že řešení automatizace lze dnes rychleji plánovat, snadněji instalovat a bezproblémově uvádět do provozu. [8]

Jelikož je krokový motor velmi specifickým typem, musíme vyhodnotit danou situaci a rozhodnout, zda je krokový motor opravdu tou nejlepší možností. Existuje řada kladů, ale také záporů a na jejich základě musíme určit použitý typ motoru.

V průmyslu se krokové motorky označují pomocí specifikací asociace NEMA.

Výhody krokového motorku:

- Robustnost
- Jednoduchá konstrukce
- Nízké nároky na údržbu
- Široké spektrum využití
- Vysoká spolehlivost z důvodu nepřítomných kartáčů (životnost je závislá čistě na ložiscích)
- Při rozběhu z klidu má plný točivý moment
- Přesné polohování
- Okamžitá odezva na změnu směru otáčení či rozpohybování nebo zastavení

Nevýhody krokového motorku:

- Nízká účinnost
- S rostoucími otáčkami klesá točivý moment
- Hlasitost
- Při nedokonalém řízení začne motor rezonovat
- Nutnost řídicího obvodu
- Vyšší ztráty vzhledem ke stejnosměrným motorům

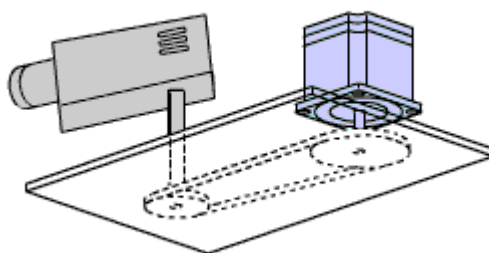
Nejběžnější aplikace krokových motorků v průmyslové automatizaci:

- Spotřební elektronika – Fotoaparáty, kamery, tiskárny, robotika apod.
- Automotive a letecký průmysl – Využívají se především k přijímání telekomunikačních signálů, tempomatu, natáčení antén, automatická snímací zařízení a kamery a skenery
- Lékařství – Snímací přístroje, mikroskopické pohyby automatizovaných strojů, dávkovací čerpadla, vzorkovače, chromatografie, analýzy atd.
- Vědecké účely – Spektrografy, teleskopy, práce s látkami v laboratoři
- Těžký průmysl – CNC stroje, frézky, vodní nebo laserové pily
- Zabezpečení – Sledovací zařízení
- Hazardní průmysl – Výherní automaty, kola štěstí atd.

Jedná se pouze o zlomek jejich reálného využití. Ve zkratce bychom mohli říct, že můžeme použít krokový motorek kdekoli, kde je zapotřebí vysoká přesnost polohování, kontrola rychlosti a vysoký točivý moment v nízkých otáčkách. [8, 9, 10, 11]

#### 4.1 Spotřební elektronika

Jedná se o největší trh s krokovými motorky vůbec. Mají zde velmi široké uplatnění, a to hlavně z důvodu spolehlivosti a nízkých nároků na údržbu. Největší část si ukusují kamery a fotoaparáty. Zde se motorky využívají především k automatickému zaostřování, a to také v mobilních telefonech, kde se nachází velmi kompaktní a tichý krokový motorek, co se týče bezpečnostních kamer tak k jejich přesnému směřování. Zde je také součástí větší řídicí jednotky, která má za úkol automaticky sledovat dění v okolí a sama využívá krokový motorek k pohybu. Jedná se převážně o krokové motorky hybridní, jelikož vzhledem ke své velikosti mají vysoký točivý moment a dokáží generovat velmi malý krok. Krokový motorek do tohoto odvětví uvedla společnost Panasonic v 90. letech minulého století. Dnes je hojně využíván většinou společnostmi převážně v nižší, střední a vyšší střední třídě. Nej kvalitnější kamery využívají náporových motorků. [12, 13]



Obrázek 15 Využití krokového motorku pro pohyb kamerového systému [13]

Další poměrně velké zastoupení mají tiskárny a 3D tiskárny, jelikož dokáží pohybovat s objektem velmi přesně a opakovaně. Využití spočívá opět především v polohování. U inkoustových tiskáren ovládá polohy trysky u 3D tiskáren polohuje extrudér, který vytlačuje materiál k tisku. Opět je nutné velmi přesné krokování s co nejmenším krokem, ale již tolik nezáleží na hlasitosti. Na čem naopak záleží je točivý moment motorku, aby byl schopen pohybovat i s větší zátěží. [14]

V neposlední řadě je využití v robotice. Zde mají velmi důležitou roli, jelikož jakýkoli pohyb vyžaduje naprostou preciznost bez tolerance chyb a krokové motorky jsou schopny tyto vlastnosti dodat. Také jejich vysoká spolehlivost napomáhá tomuto využití, protože nevyžadují téměř žádnou údržbu. Jedná se o jedno z nejkomplexnějších polí působnosti, kde krokový motorek nebývá hlavní částí systému, ale je součástí obrovského množství podsystémů, které mají za úkol řídit danou automatizovanou část stroje. [15]

## 4.2 Automotive a letecký průmysl

V automotive průmyslu se využívá krokových motorků hlavně z důvodu jejich jednoduché konstrukce. Aplikace jako např. adaptivní světlomety, nastavování klapky k ovládání teploty, změna polohy Head Up displeje, otáčení snímacích kamer, adaptivní tempomat a mnoho dalšího.

V leteckém průmyslu začaly krokové motorky mít svoje místo teprve s rozmachem polovodičových součástek ve spotřební elektronice, nicméně zde již zaujímají velmi cenné postavení, které se s výrazným rozšířením dronů utvrdilo. Nejedná se pouze o drony. Využití nachází i v letadlech, vrtulnících a také vesmírných raketách. Opět se jedná o pohyb kamerového a snímacího systému. Cílem je maximalizovat točivý moment a výkon s co nejmenší vahou z ekonomických důvodů jako je např. spotřeba paliva. [16]



Obrázek 16 Spojitost krokového motorku v automotive průmyslu [16]

## 4.3 Lékařský průmysl

Jedno z nejdůležitějších a nejprospěšnějších odvětví pro využití krokových motorků v automatizaci. Využití zde nachází od pomůcek s mobilitou hendikepovaným jako jsou elektrické vozíčky, schodové výtahy, či polohovatelná lehátka až k více sofistikovaným lékařským pomůckám jako chirurgické roboty, pumpy, ventilátory, skenery (rentgen, CT apod.) a v neposlední řadě pokročilé protetické končetiny. Důvodů využití krokových motorků v lékařství je nespočet, ale mezi hlavní patří preciznost, vysoká spolehlivost, a především okamžitá reakce na změnu pohybu. [17]



Obrázek 17 Příklad využití krokového motorku pro chirurgického robota [18]

#### 4.4 Vědecké účely

Své využití najde tento typ pohonu také v automatizaci výzkumného průmyslu. Pohání obecně využívané spektrometry, odbornější uplatnění nalezne také v astronomii a astrofotografii pro teleskopy či různá výzkumná fotografická zařízení. Nemůžeme opomenout ani využití ve vesmírném průmyslu, který je úzce spjat s leteckým průmyslem. Tento sektor je mezi sebou propojen, jelikož krokový motorek ovládá antény nebo solární panely na mezinárodní vesmírné stanici, ale také spektrografy nebo teleskopy pro výzkum. Zapomenout nesmíme ani na využití v laboratořích při práci s různými látkami pro jednoduché pohyby (dávkovače, výparníky apod.) [19, 20]



Obrázek 18 Spektrometr využívaný na území  
ČR [20]

Obecně jsou krokové motorky využívány všude, kde je zapotřebí vysoké spolehlivosti a preciznosti pohybu. Také možnost okamžité změny směru a prakticky okamžitý točivý moment přivedený na hřídel napomáhají krokovým motorkům nacházet stále větší využití v automatizačním průmyslu.

## 5 Specifikace základních požadavků na propojení krokového motorku s nadřazeným řídicím systémem

Řídicí systém má za úkol přijímat a zpracovávat signály od svého nadřazeného systému, kterým bývá většinou PC, PLC či server. Tyto signály jsou převedeny na impulzy pro krokový motorek, který je pak takto ovládán. Řídicí systém také kontroluje, aby nedošlo k poškození motorku jeho přetížením, popřípadě špatným nastavením žádaného pohybu. V dnešní době je nejpravděpodobnější narazit na celek řídicího systému s krokovým motorkem, jelikož zde jsme schopni zajistit zpětnou vazbu.

### 5.1 Návrh konstrukce

Velmi důležitým požadavkem na propojení je samotné dimenzování materiálu. Statorové vinutí musí být schopno vést dodávaný proud a nesmí docházet k příliš velkému přehřívání, chlazení je nutné nadimenzovat tak, aby se motorek udržel ve své pracovní teplotě, napájecí kabel musí mít dostatečný průřez k vedení maximálního proudu. Správně vybrat komunikační sběrnici mezi řídicím systémem a motorkem a v neposlední řadě dostatečný materiál hřídele, která bude schopna přenést maximální točivý moment do pracovního mechanismu.

### 5.2 Proud a napětí

Výstupní proud řídicího systému nám udává jak velký točivý moment, který bude krokový motorek vyvíjet. Příliš malá hodnota proudu způsobí, že motorek nebude schopen vyprodukovat daný točivý moment. To může mít za následek zasekávání motoru nebo přeskokování jednotlivých kroků. Naopak příliš velký výstupní proud řídicí jednotky způsobí přehřívání částí krokového motoru, které může vést až k samotnému zničení. Řídicí systém proto musí být schopen poskytnout dostatečné množství proudu, aby byl motor schopen pracovat na svých jmenovitých hodnotách, ale také je zapotřebí kontrolovat a nepřesáhnout maximální hodnotu proudu, aby nedošlo k poškození. [21, 22, 23]

Různé druhy a značky krokových motorů jsou, ale také přizpůsobeny jiným napětím. Proto je velice důležité dodržovat jmenovitá napájecí napětí motorku. Systém navržený na 50 V DC by měl být vždy napájen 50 V DC, jinak by docházelo k častým chybám v chodu motorku nebo by dokonce mohlo dojít ke spálení statorových vinutí a vzplanutí. [21, 22, 23]

Důležité je podotknout, že také způsob zapojení vinutí na motorku je značně důležitý pro jeho řídicí systém. Některé druhy sice podporují jak unipolární, tak bipolární zapojení, to ale není pravidlem, a proto je důležité zjistit kompatibilitu, aby nedocházelo k chybám. [21, 22, 23]

### 5.3 Start-stop frekvence

Velmi důležitým parametrem ke správnému propojení řídicího systému s krokovým motorkem je tzv. start-stop frekvence. Tímto označením se nazývá frekvence, na které je motor schopen bezpečně a bez ztráty kroku zastavovat a spouštět s dostupným točivým momentem. Nutno podotknout, že ztráta kroku může nastat při zastavování i při spouštění. [21, 22, 23, 24]

### 5.4 Rezonanční frekvence

Při působení konstantního proudu k dosažení maximálního přídržného momentu, může způsobit, že motorek začne oscilovat. Vzhledem k tomu, že se jedná o synchronní stroj, následuje vzniklé magnetické pole ve velmi úzkých mezích. Pokud není na hřídel přivedena žádná zátěž, rotor začne oscilovat mimo chtěný krok kvůli velmi malé setrvačnosti. Jakmile budeme chtít posunout motorek na další krok, může vlivem této oscilace dojít k rezonanci celého systému. [22, 23]

Tomuto jevu lze vcelku jednoduše zabránit. Nastavením start-stop frekvence vyšší než 200 Hz, protože krokové motorky v nižších frekvencích snadněji rezonují. Také je možno snížit přídržný fázový proud. Nejjistější ovšem bývá udržet zátěž motorku ve výrobcem daných mezích. [22, 23, 24]

## 6 Ezi-SERVO II Plus-E

Ezi-SERVO II Plus-E je elektrický pohonný systém od korejské firmy FASTECH ze série pohonných systému Ezi-Servo. Skládá se z externí řídicí jednotky a samotného hybridního krokového motorku se zpětnou vazbou a bipolárním řídicím systémem. Díky integrované ethernetové sběrnici je schopen komunikovat jak s průmyslovým PLC, tak domácím PC. K dispozici ve 38 různých verzích a velikostech. Samotná verze Plus E má k dispozici 7 různých velikostí krokových motorů ve specifikaci NEMA, a to 20x20mm až 86x86mm. [25]



Obrázek 19 Varianty pohonů EZI-SERVO II Plus E [25]

### 6.1 Řídicí jednotka

Systém je napájen vstupním napětím o hodnotě 24 V. Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách napětí je stejnosměrné. Řídicí systém je řízen v uzavřené smyčce s 32bitovým ARM procesorem. Jmenovitý proud činí 500 mA pro řídicí jednotku. Celková spotřeba se pak odvíjí od použitého typu motorku a jeho zátěže. Provoz je umožněn od 0 do 50 °C a relativní vlhkosti 35-85 %. Motorek je schopen dosáhnout až 3000 otáček za minutu s použitím enkodéru do 10 000 pulzů. Řízení je možno v obou směrech, systém je také osazen LED signalizací poruch a stavů. Disponuje 3 vyhrazenými vstupy a 9 programovatelnými, a také 9 programovatelnými a 2 vyhrazenými výstupy. Komunikace je možná maximální rychlostí 10/100 Mbit v plně duplexním režimu. [24, 25]

### 6.2 Parametry motorku

Motorek je ve specifikaci NEMA 23.

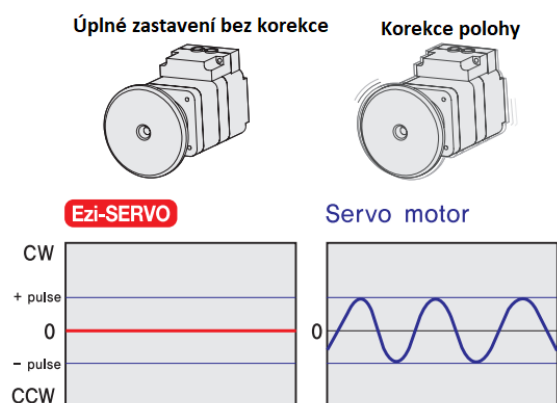
- Počet fází – 2
- Napětí – 2,64 V DC
- Fázový proud – 3 A
- Odpor fáze – 0,88  $\Omega$
- Indukčnost fáze – 4 mH
- Přídržný moment – 1,5 N·m
- Setrvačnost rotoru – 520 g·cm<sup>2</sup>
- Hmotnost – 1230 g
- Pracovní teplota – 0–55 °C [25]

### 6.3 Základní vlastnosti

Díky optickému snímači umístěnému přímo v motorku dosahuje systém velmi přesného polohování bez ztráty kroku. Do ROM paměti modulu lze navíc nahrát až 256 poloh motorku skrz ethernetové připojení a grafické prostředí v operačním systému Windows. Polohy ovšem nemusí být přednastavené a vše lze řídit ručně v reálném čase. [24, 25]

Pohon má také pokročilý systém uzavřené smyčky, který využívá motor s vysokým rozlišením na maximum. Každých 50  $\mu$ s je přijímána zpětná vazba do mikrokontroleru k přesnému nastavení aktuální polohy. To pomáhá systému kompenzovat jakoukoli nepřesnost či chybu v pohybu, aby nedocházelo ke ztrátě kroku. [24]

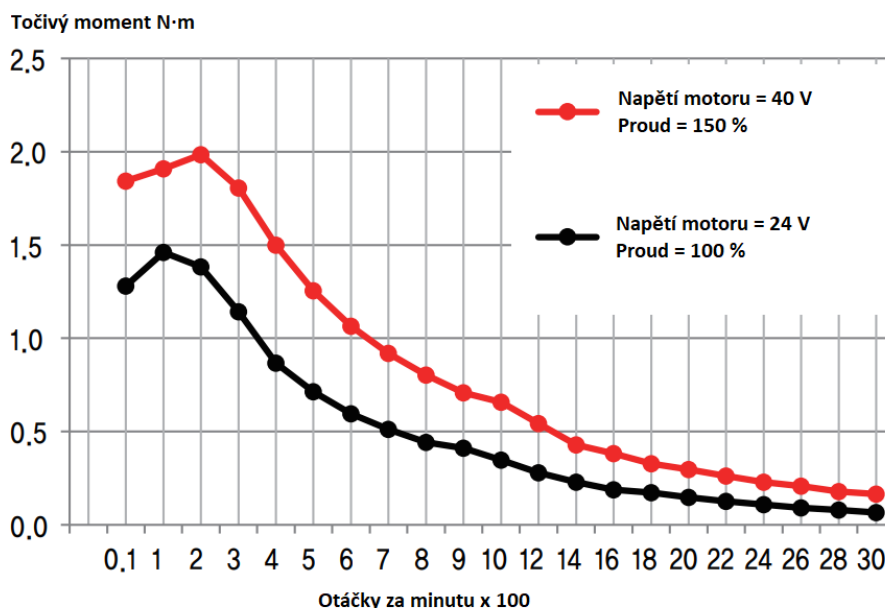
EZI SERVO II také chytře spravuje spotřebu energie a kontroluje teplotu systému. Automaticky přizpůsobuje množství dodávaného proudu v závislosti na aktuální zátěži a tím omezuje teplo a snižuje spotřebu. Protože je systém navržen na co největší přesnost a hladkost pohybu, využívá enkodér s velmi vysokým rozlišením až 20 000 pulzů na otáčku. Díky tomu také nedochází k tzv. přestřelení polohy a její následné korekce posunutím motorku opačným směrem. Tím pádem se nevyskytují žádné nechtěné vibrace a nepřesnosti v pohybu, které by mohly způsobit problém v konečné aplikaci. Viz. Obrázek 20. [24]



Obrázek 20 Porovnání úspěšného zastavení s nutnou korekcí [24]

Díky výkonnému a rychlému mikrokontroleru je odezva také velmi rychlá.

Součástí je interní DC-DC měnič, který mění hodnotu dodávaného napětí. Točivý moment je při vyšších rychlostech navýšen díky změně napětí, a proto je možné přesáhnout maximální proud až o 50 % přičemž točivý moment je při těchto vyšších rychlostech větší (viz. Obrázek 21). [24]



Obrázek 21 Změna točivého momentu s otáčkami za minutu v případě využití DC-DC měniče a bez něj [24]

Velkou předností EZI SERVO II je možnost udržení vysokého točivého momentu po delší časový úsek a velké rychlosti bez ztráty kroku či synchronizace při 100 % zátěži. [24]

## 6.4 Možnosti systému

Jak už bylo řečeno celý systém lze ovládat skrz dostupný software Ezi-MOTION, který můžeme nalézt na stránkách výrobce. Jelikož systém Ezi-SERVO II Plus-E pracuje na základě internetových protokolů skrz ethernetovou sběrnici, je nutné po samotném připojení řídicího systému k PC, či PLC správně tyto protokoly nastavit. Přímou v programu poté stačí zadat v řídicím systému nastavenou IP adresu a pohon je propojen. Tímto postupem se zabýváme v kapitole s demonstrační úlohou (kapitola č. 7). [25, 26, 27]

Software je značně jednoduchý a velmi uživatelsky přívětivý s výrobcem vytvořeným manuálem. Ve vrchní části se nachází řádek s dostupnými příkazy (Viz. Obrázek 22). Odtud se můžeme orientovat po celé pracovní ploše.



Obrázek 22 Příkazový řádek v programu Ezi-MOTION

Prvním příkazem „Connect“ (Obrázek 23) se nám otevře okénko, kde můžeme vyhledat veškerá připojená zařízení Ezi-SERVO, popřípadě sami vyhledat zařízení pomocí IP adresy. Dalším v pořadí je „Board List“ (Obrázek 24), který nám zobrazí všechna připojená zařízení. Těch může být v jednu chvíli připojeno až 254. [26, 27]





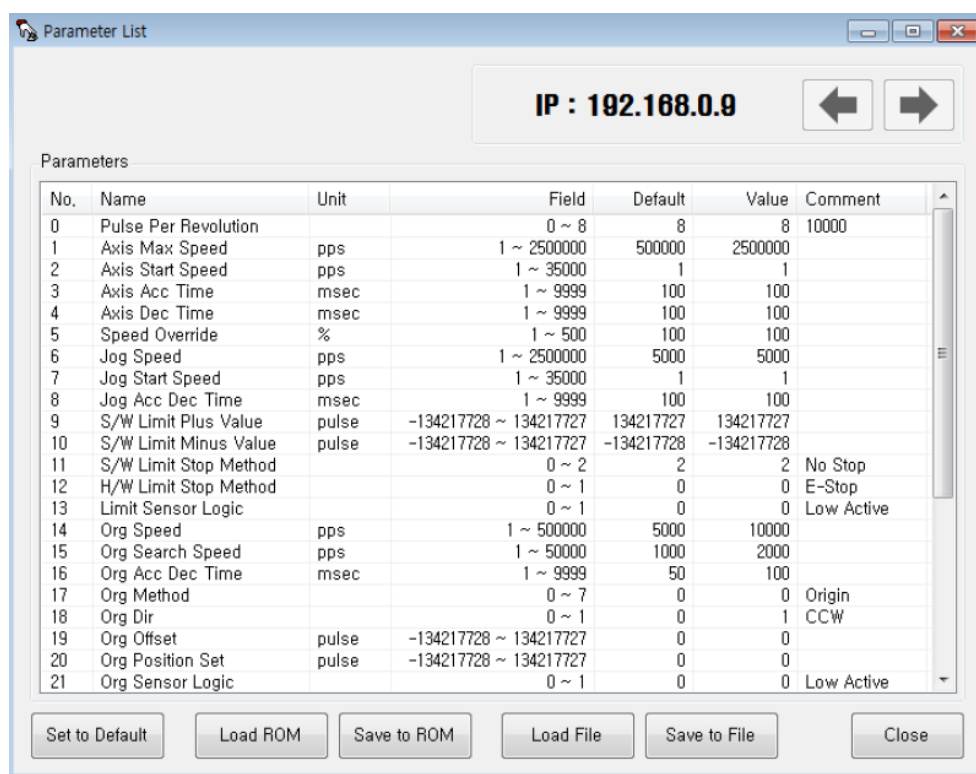
Obrázek 23 Okno pro připojení zařízení

Board List				
Product	Type		Version	
IP : 192,168,0,9	Ezi-SERVO2 Plus-E ST	Motor: 42L DI	Ezi-SERVO2 ST Plus-E (V06,01,020,02)	
IP : 192,168,0,10	Ezi-SERVO2 Plus-E ST	Motor: 42L DI	Ezi-SERVO2 ST Plus-E (V06,01,020,02)	
IP : 192,168,0,11	Ezi-SERVO2 Plus-E ST	Motor: 42L DI	Ezi-SERVO2 ST Plus-E (V06,01,020,02)	
IP : 192,168,0,12	Ezi-SERVO2 Plus-E ST	Motor: 42L DI	Ezi-SERVO2 ST Plus-E (V06,01,020,02)	

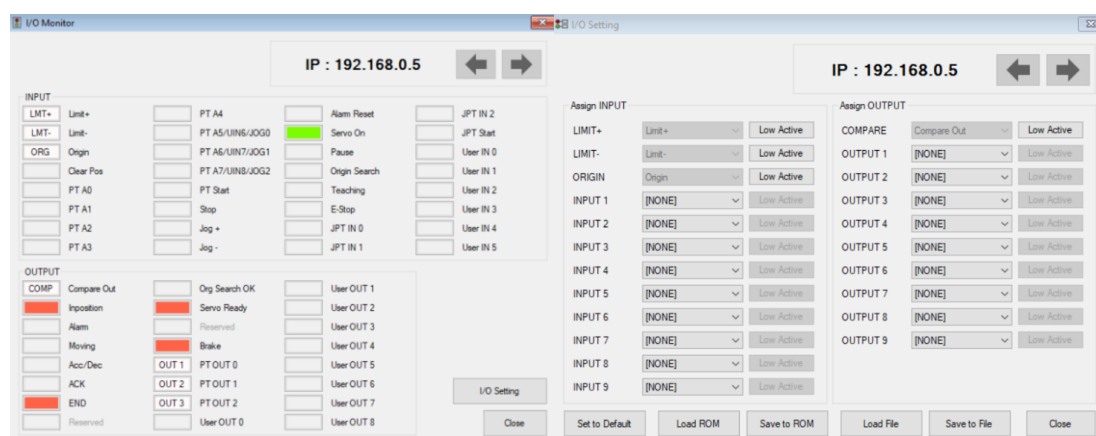
Obrázek 24 Výpis všech připojených zařízení [26]

Tlačítko „Parameter List“ (Obrázek 25) Vypíše všechny proměnné, které jako uživatel jsme schopni změnit. Můžeme zde ovládat např. počet pulzů na jednu otáčku motorku nebo zrychlení či naopak zpomalení otáčení. Je zde také možnost všechna nastavení uložit do ROM paměti řídicího systému nebo exportovat do souboru k použití na jiném zařízení. [26, 28]

Následují dva příkazy pro práci se vstupy a výstupy (Obrázek 26). „I/O Monitor“ zobrazuje aktuální stavy všech vstupů a výstupů systému. „I/O setting“ nám umožňuje tyto programovatelné vstupy a výstupy nastavovat. Máme-li k dispozici také fyzický panel vstupů a výstupů, je možno sledovat tyto stavy zde. Opět je možnost uložit nastavení I/O do ROM paměti či do souboru. [26]



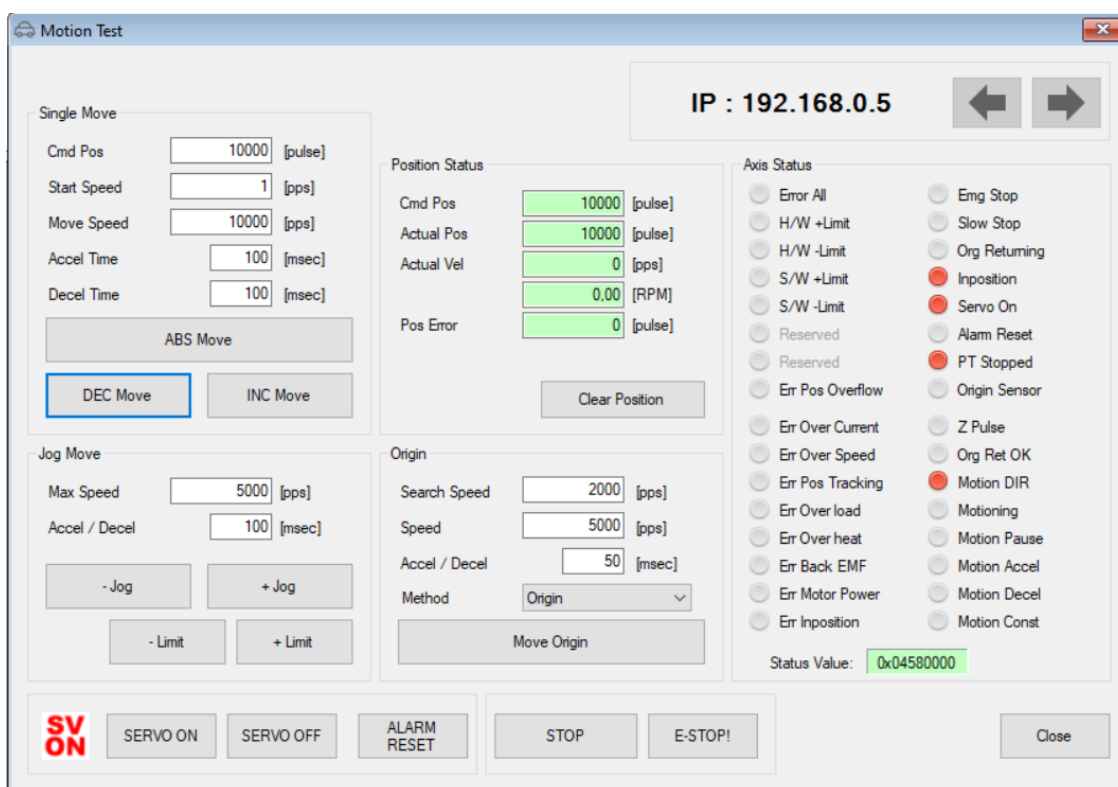
Obrázek 25 Výpis všech proměnných řídicího systému



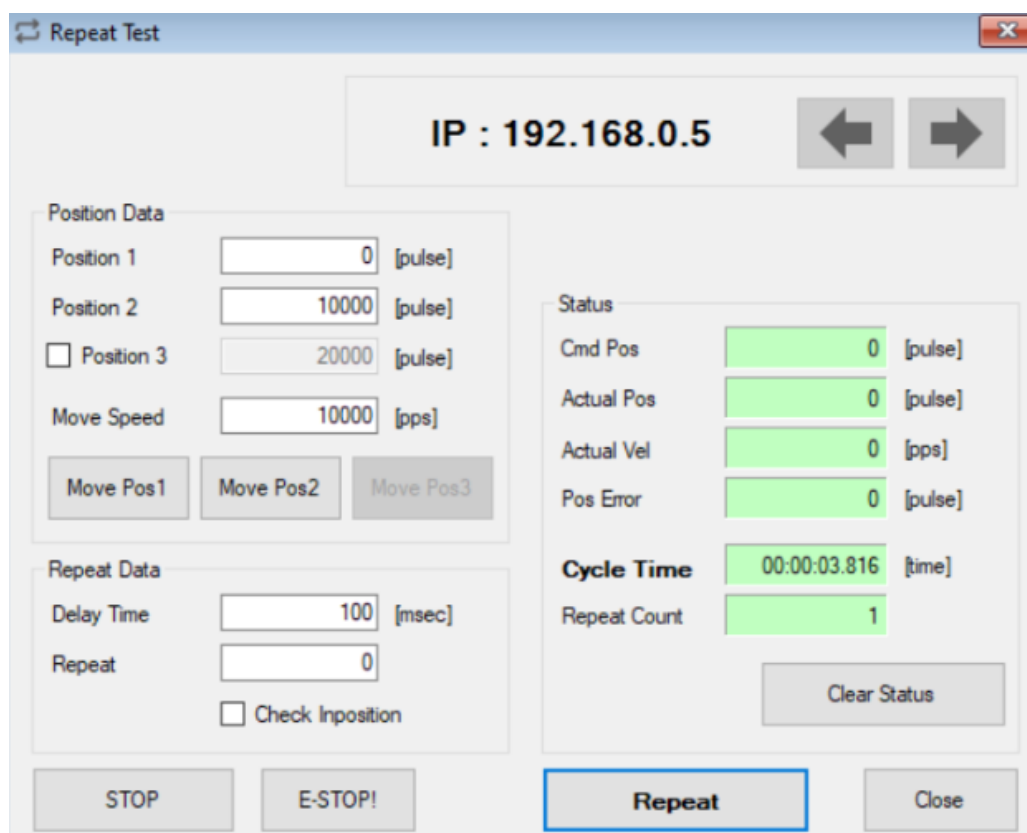
Obrázek 26 Ovladač vstupů a výstupů v programu

V další sekci příkazového řádku pak nalezneme samotné části softwaru pro pohyb s motorem. „Motion Test“ (Obrázek 27) slouží k otestování funkčnosti motoru a řídicího systému, popřípadě funkčnosti poháněného systému. Můžeme zde pohybovat motorem po jednotlivých krocích, kontrolovat jeho aktuální pozici, jestli nedochází ke ztrátě kroku a také zde máme výpis chyb. [26]

„Repeat Test“ (Obrázek 28) využijeme v případě testování poháněného systému v po sobě se opakujících krocích. Lze zde nastavit až tři pozice rotoru, časový rozestup mezi jednotlivými opakováními a počet opakování. Opět nechybí panel s kontrolou pozice. [26]

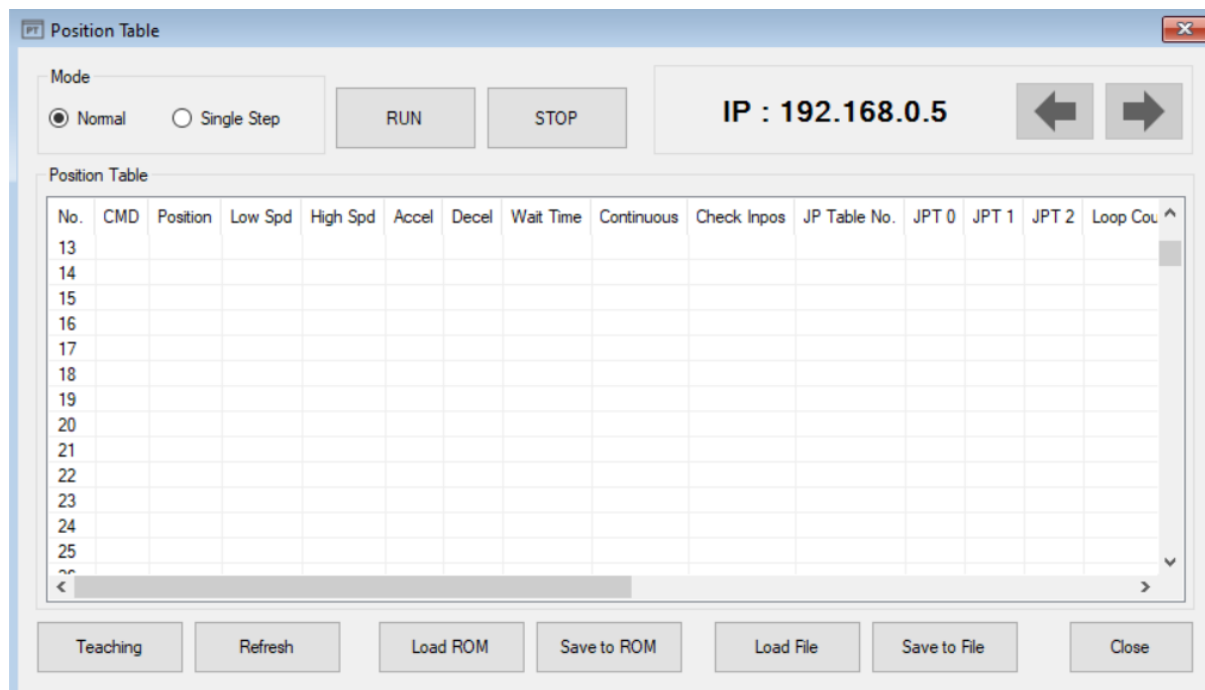


Obrázek 27 Okno Motion Test pro testovací práci se systémem



Obrázek 28 Opakovaný test na kontrolu poháněného systému

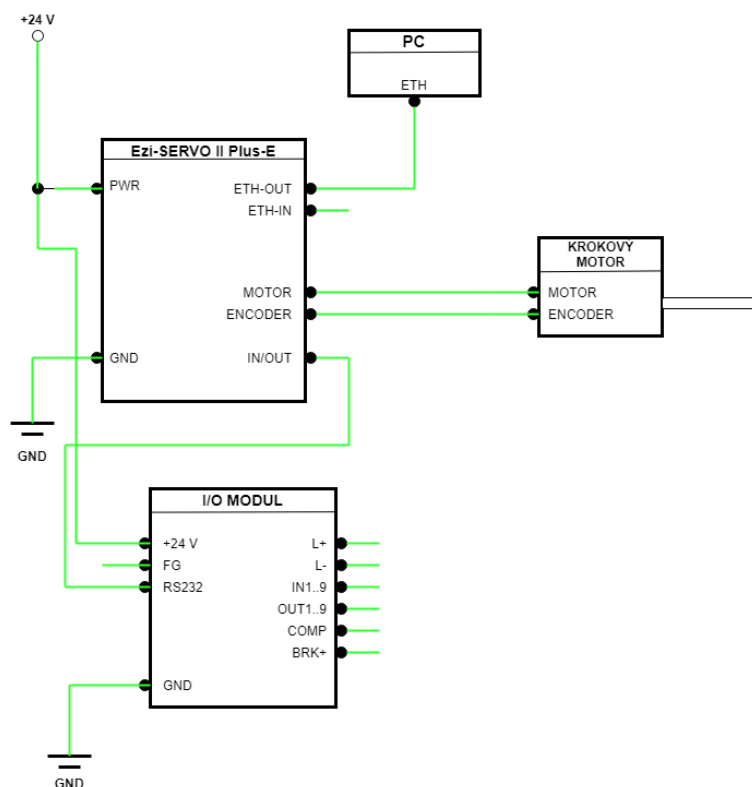
Posledním v pořadí je samotný ovládací program motorku „Position Table“. Jak již název napovídá jedná o tabulku jednotlivých kroků, jež má motorek vykonat. Pokynů je možno použít až 256 s různými nastaveními. Nechybí funkce pro uložení do paměti ROM nebo export do souboru. [22]



Obrázek 29 Seznam poziční kroků pro vykonání

## 7 Demonstrační úloha

Poslední částí této práce je zpracování demonstrační úlohy, která nám zjednodušeně předvede, jak takový systém funguje. Úloha se bude skládat z pěti otáček po směru hodinových ručiček, vteřinové pauzy, pěti otáček proti směru hodinových ručiček a opět vteřinové pauzy, kde každá otáčka bude trvat 1 vteřinu. Tento cyklus se bude opakovat 3x s tím, že každý úkon rozsvítí svou příslušnou LED.

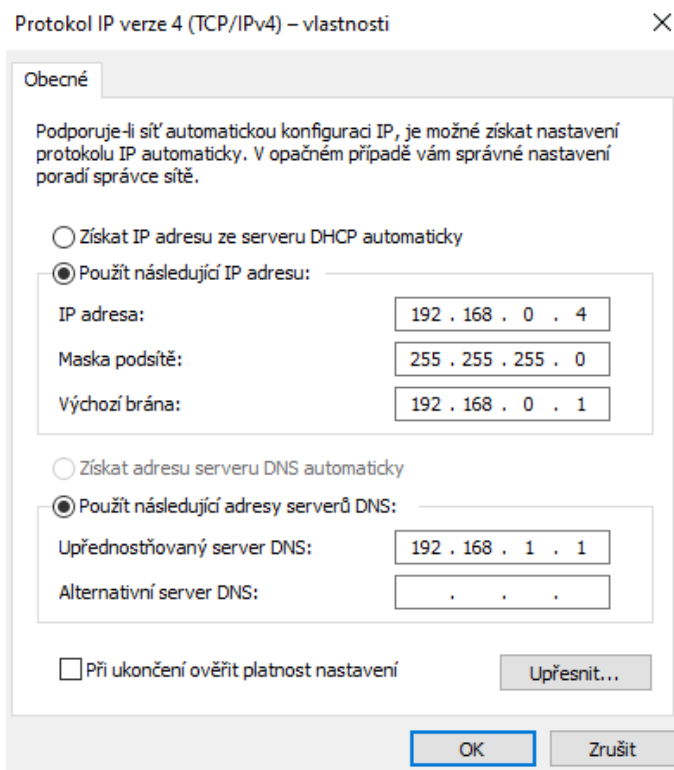


Obrázek 30 Schéma zapojení systému Ezi-SERVO II Plus-E

### 7.1 Nastavení síťového adaptéru

Jak již bylo výše uvedeno, systém komunikuje skrze ethernetovou sběrnici, tudíž je ke správné komunikaci důležité nastavit správné internetové protokoly. Ve vlastnostech síťového adaptéru upravíme IPv4 (internetový protokol verze 4). Výrobce veškeré potřebné informace o IP k propojení dodává ve svém uživatelském manuálu.

Základem je správně zadat masku podsítě a výchozí bránu, skrz tyto IP je prováděna hlavní identifikace. IP adresa poté udává přesnou adresu našeho řídicího systému. Tu nastavujeme přímo na krytu pomocí posuvníků (viz. Obrázek 32). Jakmile máme správně nastavené veškeré potřebné IP adresy, můžeme přejít k navázání spojení systému a PC.



Obrázek 31 Nastavení IP dle manuálu



Obrázek 32 Posuvníky na řídicím systému k nastavení IP

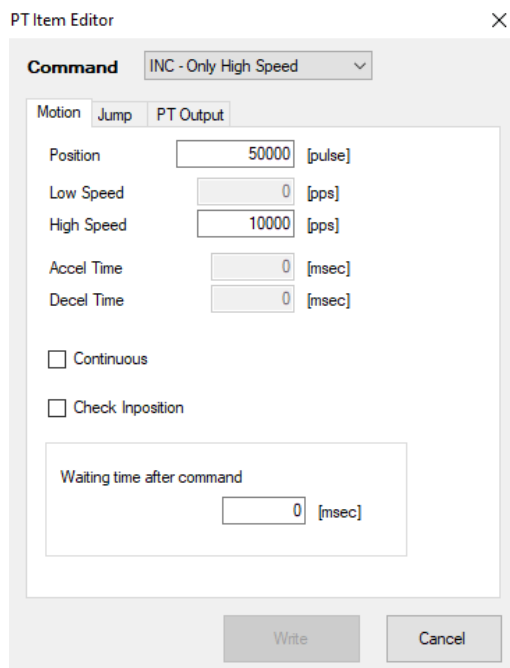
## 7.2 Realizace úkolu

Než začneme samotné nastavování pohybu motorku, je důležité nastavit krokování. V parametrické tabulce si můžeme jednoduše nastavit jak přesné chceme rozlišení neboli jak jemný chceme krok. Protože se jedná o předváděcí úlohu a ve skutečnosti nebudeme nic pohánět můžeme si vybrat rozlišení jakékoli chceme. Já jsem zvolil rozlišení 10 000 pulzů na otáčku, aby bylo vidět, že i krokový motorek je schopen plynulého pohybu.

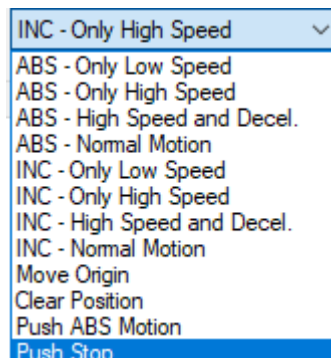
Parameters						
No.	Name	Unit	Field	Default	Value	Comment
0	Pulse Per Revolution		0 ~ 36000	8	10000	
1	Axis Max Speed	pps	1 ~ 500000	500000	500000	
2	Axis Start Speed	pps	1 ~ 500000	1	1	
3	Axis Acc Time	msec	1 ~ 9999	100	100	

Obrázek 33 Nastavení parametrů

Ted' již můžeme přejít k „programování“ motorku. Je zapotřebí si jako první vybrat funkci, kterou chceme, aby řídicí systém provedl (viz. Obrázek 35). ABS označuje absolutní pozici motorku, INC zase inkrementaci o přesný počet pulzů. Podle Obrázku 34 vidíme, že Inkrementujeme o 50000 pulzů rychlostí 10000 pulzů za vteřinu  $t = \frac{50000}{10000} = 5$  s. Krok číslo tři, tedy otočení protisměru hodinových ručiček, bude vypadat téměř identicky pouze s opačným znaménkem u počtu pulzů, takže budeme dekrementovat.

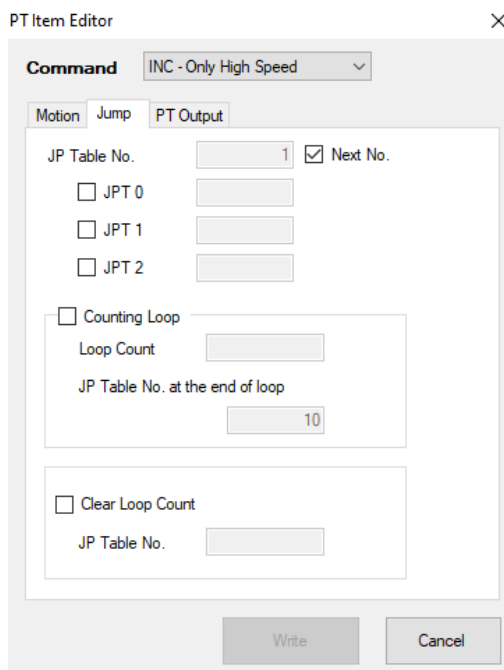


Obrázek 34 Nastavení pohybu v poziční tabulce



Obrázek 35 Výběr funkcí

Nastavíme, jaký krok má po dokončení tohoto úkolu motorek vykonat pomocí možnosti „Next No.“ na Obrázku 36.



Obrázek 36 Nastavení skoku na další krok

V poslední kolonce nastavíme výstupy kroku. Za úkol je rozsvítit LED na připojeném panelu. Vybereme si tedy jeden ze tří možných výstupů (pro každý úkon bude svítit jedna LED). Je důležité tento výstup ještě přiřadit fyzickým diodám.

Obrázek 37 Možnosti výstupů poziční tabulky

Obrázek 38 Nastavení výstupů z poziční tabulky

Sekundová pauza se provede vyplněním kolonky v první záložce „Waiting time after command“. Jelikož jsou zde jednotky v ms musíme doplnit číslo 1000. Změna pozice bude v tomto případě nulová, protože nechceme, aby se motorek jakkoli točil.

Abychom dosáhli požadovaného počtu opakování, musíme v druhé záložce „Jump“ nastavit počítání cyklů. Zaklikneme položku „Counting Loop“, opakování nastavíme na 3 a vybereme krok na který se má program přesunout, v našem případě 10. Krok deset už slouží pouze k oznámení, že byl úkol dokonán, rozsvítí všechny 3 LED a po 5 sekundách pokročí ke kroku 11, který zastaví celý program pomocí funkce „Push Stop“.

Position Table																
No.	CMD	Position	Low Spd	High Spd	Accel	Decel	Wait Time	Continuous	Check Inpos	JP Table No.	JPT 0	JPT 1	JPT 2	Loop Count	Loop JP Table No.	Loop C
0	5	50000	0	10000	0	0	100			1					10	
1	5	0	0	10000	0	0	1000			2						
2	5	-50000	0	10000	0	0	100			3						
3	5	0	0	10000	0	0	1000			0				3	10	
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10	9	0	0	0	0	0	5000			11						
11	11	0	0	0	0	0	0									
12																

Obrázek 39 Finální poziční tabulka



## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešerši o pohonech s krokovými motory, jejich základním rozdělením, principu funkce, možnostech řízení a jejich využití v průmyslové automatizaci. Dále specifikovat základní požadavky řídicího systému ke správnému propojení s krokovým motorem, popsat možnosti použitého systému Ezi-SERVO II Plus-E a demonstrovat s ním jednoduchou úlohu.

První část práce se zabývá teorií krokových motorků, jejich jednoduchým rozdělením na nejjednodušší motorky s proměnnou reluktancí a permanentním magnetem až k jejich nástupci a komplexnějšímu hybridnímu motorku a detailnějším popisem funkce všech tří uvedených typů. Důležitou částí je také zmínit jejich hlavní rozdíly. Nesmí se zapomenout ani na dva základní způsoby řízení, které jsou nedílnou součástí každého krokového motoru a zmínit výhody či nevýhody daného zapojení. Následuje konkrétní využití krokových motorků v průmyslu, jako je automotive nebo bezpečnostní zařízení, souhrn jejich výhod a nevýhod v daném odvětví a prospěšnost těchto pohonů v automatizaci.

Další kapitola popisuje základní potřebné znalosti, abychom mohli řídicí systém propojit s krokovým motorkem. Důležité je nezapomenout, že se jedná o elektrické zařízení, a proto je nutné dodržet základní znalosti z tohoto odvětví. Správně dimenzovat vodiče, nenamáhat materiál a kontrolovat výkon. Nesmí se, ale také zapomenout na chování elektrického obvodu v oblasti rezonanční frekvence.

V poslední teoretické kapitole se v práci zabývám detailním popisem možností uvedeného systému a jeho hlavními přednostmi. Systém dokáže chytře pracovat s napětím a proudem a dodávat vždy potřebné hodnoty do motorku, takto ovládat jeho točivý moment nebo redukovat jakékoli rezonance.

Závěrem se detailně zabývám a popisuji jednoduchou demonstrační úlohu. Jak dosáhnout stejného výsledku krok po kroku a čemu je nutné se vyvarovat.

## Seznam použité literatury

- [1] ACARNLEY, Paul. *Stepping Motors - A Guide to Theory and Practice*. 4th ed. London: Institution of Engineering and Technology, 2002. ISBN 978-0-85296-417-0.
- [2] HRABOVCOVÁ, V., L. JANOUŠEK, P. RAFAJDUS a M. LIČKO. *Moderné elektrické stroje*. 2. vyd. Žilina: Žilinská Univerzita, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [3] DC motor krokový 5V/2A pro tiskárny Nema 17. In: GM Electronic [online]. Praha, ČR: GM Electronics, 2021 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/krokovy-motor-nema-17>
- [4] Princip krokového motoru. In: Mylms [online]. ČR: Mylms, 2021 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/krokovy-motor-princip/>
- [5] WASYLUK, Rostislav. *Elektrotechnologie*. Praha: Scientia, 2004. ISBN 80-7183-306-1.
- [6] Krokové motorky. In: Robotika.cz [online]. Praha: Kamil Řezáč, 2002 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [7] Unipolar stepper motor driver. In: Petervis.com [online]. West Croydon: Peter J. Vis, b.r. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.petervis.com/dictionary-of-digital-terms/unipolar-stepper-motor-driver/unipolar-stepper-motor-driver-circuit.html>
- [8] Automatizace v průmyslu II – Motory a řídicí systémy. In: Haberkorn [online]. Mokré Lazce: Haberkorn, 2019 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.haberkorn.cz/detail/614/automatizace-v-prumyslu-ii-motory-a-ridici-systemy>
- [9] Stepper Motor Applications. In: OSMTEC [online]. Ningbo: OSMTEC, 2020 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: [https://www.osmtec.com/stepper\\_motor\\_applications.htm](https://www.osmtec.com/stepper_motor_applications.htm)
- [10] What is a Stepper Motor: Types & Its Working. In: ElProCus [online]. Hyderabad: ElProCus, 2019 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/stepper-motor-types-advantages-applications/>
- [11] What Kinds of Applications are Best for Stepper Motors? In: Motioncontrolonline.org [online]. Michigan: Motion Control Online, 2019 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.motioncontrolonline.org/blog-article.cfm/What-Kinds-of-Applications-are-Best-for-Stepper-Motors/76>
- [12] The 5 Lens Autofocus Drive Types Explained. In: PentaxForums [online]. Neuvedeno: PentaxForums, 2018 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.pentaxforums.com/articles/photo-articles/lens-autofocus-drive-comparison.html>
- [13] Camera Operation. In: Oriental Motor [online]. USA: Oriental Motor, 2017 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.orientalmotor.com/applications/rotate-camera.html>
- [14] 3D Printer Stepper Motor: All You Need To Know. In: All3DP [online]. Balaton: Emmet Grames, 2018 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-stepper-motor-what-to-consider-and-which-to-choose-2/>
- [15] B. Arango, P. K. Soori and P. Talukder, "Stepper motor drives for robotic applications," *2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia, Melaka, Malaysia*, 2012, pp. 361-366, doi: 10.1109/PEOCO.2012.6230890.
- [16] Automotive Bipolar Stepper Motor. In: STmicroelectronics [online]. Ženeva: ST Microelectronics, 2021 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/applications/automotive-motor-control/automotive-bipolar-stepper-motor.html>

- [17] Medical. *ElectroCraft* [online]. Stuttgart: ElectroCraft, b.r. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.electrocrafter.com/motors-for/medical>
- [18] Four Robotics Trends Expanding the Need for Miniature Motors. In: *MachineDesign* [online]. New York: MachineDesign, 2020 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/markets/robotics/article/21133894/four-robotics-trends-expanding-the-need-for-miniature-motors>
- [19] *Drive System for Aerospace and Aviation*. Schönaich: Faulhaber Group, 2019. ISBN 000-9332-18.
- [20] Spektograf. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Spektrograf#/media/Soubor:Solar\\_Spectrograph\\_2,\\_Ond%C5%99ejov\\_Astronomical.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Spektrograf#/media/Soubor:Solar_Spectrograph_2,_Ond%C5%99ejov_Astronomical.jpg)
- [21] Stepper Motors and Drives for Automation. In: OMEGA Engineering Technical Reference [online]. Arthur-Sauvé, Francie: Omega Environmental, 2009 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: [https://mx.omega.com/prodinfo\\_eng/stepper\\_motors.html](https://mx.omega.com/prodinfo_eng/stepper_motors.html)
- [22] What features need to be compatible for a stepper drive to run a given stepper motor? Motion Control Tips [online]. Los Angeles, USA: MotionControl Tips, 2016 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/faq-features-need-compatible-stepper-drive-run-given-stepper-motor/>
- [23] Stepper motor controller. *FESTO* [online]. Esslingen am Neckar, Německo: FESTO AG & Co., 2018 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: [https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/321725/SEC-ST\\_2003-10a\\_663682g1.pdf](https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/321725/SEC-ST_2003-10a_663682g1.pdf)
- [24] Ezi-SERVO® II Plus-E: Closed Loop Stepping System [online]. *Fastech* [cit. 2021-04-20]. 83 s. *User Manual*. Dostupné z: <https://fastech.co.kr/new/eng/sub0301.php>
- [25] Ezi-Servo2 Plus-E Ethernet. *Raveo* [online]. Otrokovice: Raveo, 2021 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/Ezi-Servo2-Plus-E-Ethernet>
- [26] Ezi-SERVO® II Plus-E: Closed Loop Stepping System [online]. *Fastech* [cit. 2021-04-20]. 22 s. *User Program GUI*. Dostupné z: <https://fastech.co.kr/new/eng/sub0301.php>
- [27] Ezi-SERVO® II Plus-E: Closed Loop Stepping System [online]. *Fastech* [cit. 2021-04-20]. 130 s. *Communication*. Dostupné z: <https://fastech.co.kr/new/eng/sub0301.php>
- [28] Ezi-SERVO® II Plus-E: Closed Loop Stepping System [online]. *Fastech* [cit. 2021-04-20]. 24 s. *Position Table*. Dostupné z: <https://fastech.co.kr/new/eng/sub0301.php>